

风电场调频响应指标的决策方法

张泰东¹

ZHANG Taidong

摘要

电力系统呈现出的“双高”特性减弱了系统的频率调节能力。在风电已经成为电力系统重要电源的情况下,如果其能够参与频率调节,将对维持系统的频率稳定产生积极作用。基于此,文章探讨了风电场调频响应指标的决策方法。首先,采用分步寻优方案,验证了该方案的快速性;其次,基于分步寻优方案的指标快速生成策略,通过仿真对指标快速生成策略进行可行性和快速性的验证;最后,对风电场按照指标要求响应参与调频的效果进行了验证。提出基于分步寻优和 GSFR 模型的风电场调频响应指标快速决策方法,并通过仿真验证了其可行性和快速性。

关键词

风力发电;调频;响应指标;决策指标;分步寻优策略

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.05.038

0 引言

近年来,化石燃料等不可再生资源面临的枯竭危机以及开采能源造成的环境污染成为全社会共同关注的话题。以风、光为主的可再生能源成为各国积极研究的方向。但新能源的大量并网也造成了系统惯性减小,使得系统整体调频能力降低,且存在难以充分发挥新能源调频能力的问题。如何对新能源更好地控制与利用,是国家乃至人类可持续发展的重要课题。在各种新能源发电形式中,由于风电通常采用易于控制的集中并网形式,并且具有较好的调频潜力,因此其参与系统频率调节被寄予了厚望^[1]。基于此,本文深入探讨了风电场调频响应指标的决策方法,针对电力系统“双高”特性导致的频率调节能力减弱问题,提出了基于分步寻优和通用系统频率响应(GSFR)模型的快速决策方案。

1 调频响应指标的快速决策模型

根据风电机组在频率快速响应过程中输出功率变化的形态特征,本文提出了关于功率变化量 ΔP 的4个功率变化指标,如表1所示,以确定风电场参与快速频率响应时需要提供的输出功率。

表1 输出功率决策指标

指标	含义
ΔP_{MAX}	功率变化的最大值
T_M	功率变化达到 ΔP_{MAX} 的时间
ΔP_{MIN}	功率变化的最小值
T_Z	功率变化归零的时间

1. 温州机场集团有限公司 浙江温州 325000

为快速确定表1所列的4个指标的值,本文使用了如图1所示的基于通用系统频率响应(GSFR)模型的快速仿真模型。GSFR可以模拟整个电力系统在产生功率扰动,即功率缺额情况下的频率变化^[2]。由于GSFR的阶数不高,计算速度远远高于全电力系统仿真的计算速度。 $\Delta P_d(t)$ 为风电机组支撑功率减去系统功率缺额后的功率差值, $\Delta f(t)$ 为整个电力系统的频率变化量。

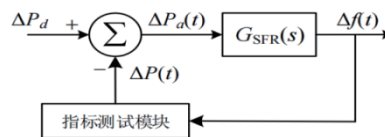


图1 基于GSFR的指标确定模型

指标测试模块根据电力系统的频率变化量 $\Delta f(t)$ 对表1所列4个指标的值进行调整,当 $\Delta f(t)$ 的1st Nadir在目标频率之上,即指标提供的功率支撑高于目标频率要求的功率支撑时,按照寻优路线将指标中的 ΔP_{MAX} 、 T_Z 以及 T_M 不断调小,使系统频率响应的1st Nadir不断减小,逐渐靠近目标频率要求的1st Nadir;若指标提供的功率达不到目标频率要求的功率,则按照寻优路线不断增大 ΔP_{MAX} 、 T_Z 以及 T_M ,直到达到目标频率要求。

若2nd Nadir的变化量大于目标频率要求的变化量,则以同样的方式,按照寻优路线不断调小 ΔP_{MIN} ,使2nd Nadir的变化量逐渐减小,以达到目标要求,反之亦然。

通过以上方式,即可找到满足目标频率要求的指标数值与图形化指标,风电场提供的功率支撑只要满足该指标测试模块生成的指标要求,则系统的频率最低点和第二次频率下降的程度都可以达到预期要求。

2 调频响应指标的决策方法

此前所提出的指标中有 4 个具体指标。由于各个指标之间的耦合关系，即改变任一指标，其余指标均会发生相应变化；各个指标对频率响应都有一定的影响，且频率响应结果无规律，即有规律地改变任一指标，对应的频率响应也会发生无规律变化；由于该寻优要涉及两级寻优，既要满足指标为最优，又要满足系统频率抬升至目标频率，而对于指标的最优性没有明确的寻优策略；当发生功率扰动时，风电机组要迅速参与调频，这就要求风电场指标的生成速度一定要足够的快，要在秒级以内^[3]。基于以上要求，本文提出了基于分步寻优的风电场指标生成方案。分步寻优具体步骤如下：

步骤 1：以实现系统频率最低值控制目标 $f_{\min 1}$ 为前提，根据以最少的能量实现调频目标的现实需求，以实现风电场提升到目标频率以及有功功率增发段所包围面积 $T_Z \cdot \Delta P_{\max} / 2$ 最小为寻优目标，以面积 $k^{(n)} = T_Z \cdot \Delta P_{\max} / 2$ 为寻优方向，即以图 2 中红色长箭头所指方向寻优，若 $k^{(n)}$ 中没有能够实现系统频率最低值控制目标的 $\Delta P_{\max}$ 和 T_Z ，则增大面积，使 $k^{(n+1)} = k^{(n)} + \Delta k$ ，如以图 2 中橘色短箭头所指方向位移，而后在 $k^{(n+1)}$ 约束下继续寻优，直到寻到满足调频要求的 $\Delta P_{\max}$ 和 T_Z ，由此确定指标 $\Delta P_{\max}$ 和 T_Z 的数值。

步骤 2：固定已确定的 $\Delta P_{\max}$ 和 T_Z 数值，以指标 $\Delta P_{\min}$ 的下限为初始值，逐次增加 $\Delta P_{\min}$ 直到满足系统频率二次跌落幅度 Δf_2 要求为止。

分步寻优方法在指标范围内以一定方向寻优，几乎遍及整个寻优范围，因此若风电场的调频能力能够达到调频目标，则通过该方法一定能够获得寻优结果；由于前期对指标范围进行有效缩小，搜索范围被有效限制，因此通过分步寻优方法可快速确定最优指标。

3 基于分步寻优的指标快速决策方法

指标快速决策方法具体流程图如图 2 所示。具体步骤如下：

步骤 1：根据系统当前运行方式，获得系统频率响应函数；然后基于系统频率响应函数，仿真获得风电机组在不同风速、不同程度的系统预想功率缺额下的响应曲线及对应的 4 个指标数值（简化响应曲线）。

在进行仿真时，风速以 0.1 m/s 为步长变化，变化范围根据风电机组运行风速范围确定。获得风电机组的响应时，不将风电机组的功率反馈回系统，仅将系统在预设功率缺额下的频率变化输入到风电机组。

步骤 2：判断系统中同步发电机的开机组合和发电功率是否发生较大变化，若是则重新执行步骤 1，否则进入步骤 3。

步骤 3：判断系统是否发生重大功率缺额，若是则进入步骤 4，否则返回步骤 2。

步骤 4：采用系统频率响应函数，计算出风电不参与调频情况下系统频率的最大跌落程度，考虑系统各种常规调频手段的能力后确定系统频率最低值的控制目标 $f_{\min 1}$ （以 0.05 Hz 为步长）以及对应的风电场等效阶跃支撑功率 ΔP_{step} ，确定系统频率恢复过程中的频率二次跌落幅度 Δf_2 。

步骤 5：根据风电场内各风电机组当前风速，确定风电场各决策指标的数值或取值范围，具体方法为：

（1）根据各风电机组当前风速和系统频率最低值的控制目标，例某地 n 台风电机组，在步骤 1 所得的结果中查询获得不同风速下该地所有 n 台机组的 $\Delta P_{\max}$ 、 T_M 、 T_Z 、 $\Delta P_{\min}$ 的数值，依次对 n 台风电机组进行计算，获得每台风电机组的 $\Delta P_{\max}$ 、 T_M 、 T_Z 、 $\Delta P_{\min}$ 数据，根据获得的 4 个指标数据即可得到每台风电机组类似图形化指标形态的简化功率实线。并将 n 台风电机组的简化功率实线累加获得风电场的有功功率简化响应曲线。

（2）由于分步寻优中有功功率增发段所包围面积与 T_M 无关，因此将 T_M 设定为固定值。通过获取的风电场的有功功率简化响应曲线数据，将指标 T_M 设定为风电场功率达到最大值的时间，获取公式为：

$$T_M = T \left(\text{MAX} \left(\sum_{i=1}^n \Delta P_i(t) \right) \right) \quad (1)$$

式中： $\Delta P_i(t)$ 为第 i 台风电机组的功率响应。

指标 $\Delta P_{\max}$ 取值上限的获取公式为：

$$\Delta P_{\max} H = \text{MAX} \left(\sum_{i=1}^n \Delta P_i(t) \right) \quad (2)$$

指标 $\Delta P_{\max}$ 的取值下限为步骤 4 中计算所得的风电场等效阶跃支撑功率 ΔP_{step} 。

指标 $\Delta P_{\min}$ 取值上下限的获取公式为：

$$\begin{aligned} \Delta P_{\min} L &= \text{MAX} \left(\sum_{i=1}^n \Delta P_i(t) \right) \\ \Delta P_{\min} H &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

因风电场提供的 T_Z 最小值要大于所有机组中 T_Z 最小的一台机组，风电场提供的 T_Z 最大值要小于全风电场参与时的 T_Z ，因此取全风电场输出有功功率的 T_Z 和所有风电机组中指标 T_Z 的最小值分别作为指标 T_Z 取值的上限和下限。

步骤 6：在步骤 5 所确定的指标取值范围内对各指标进行分步寻优，分步确定各指标的具体数值。

以上为指标快速生成策略的具体步骤。

滚动计算风电机组实际输出功率曲线可以提高功率精度，可以减小风电机组后期参与调频时整个系统的频率响应误差，但由于要计算的时间步长小、尺度大，因此若要计算各个风电机组的实际输出功率数据对计算速度有较高的要求^[4]。本文是用风电机组简化功率实线代替风电机组实际输出功率曲线，通过该替代方法，可以加快计算速度。

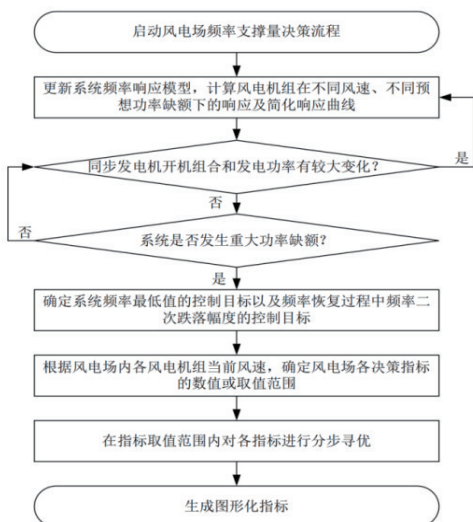
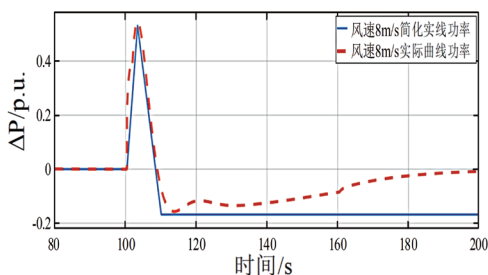
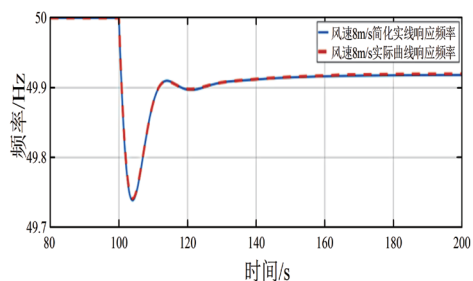


图2 风电场调频响应指标快速决策流程图

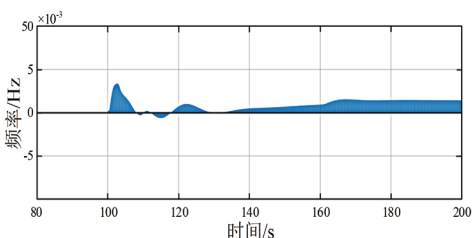
将 8 m/s 风速下单台机组的调频参数设置为 $K_{df}=10$ 、 $K_{pf}=155$ ；12 m/s 风速下单台机组的调频参数设置为 $K_{df}=10$ 、 $K_{pf}=25$ 进行仿真。仿真后，8 m/s、12 m/s 时简化功率实线和实际功率曲线、对应的频率响应以及频率响应误差如图 3~4 所示。图中均以单台机组 1.5 MW 的容量为基准值。



(a) 8 m/s 时简化功率实线与实际功率曲线对比图

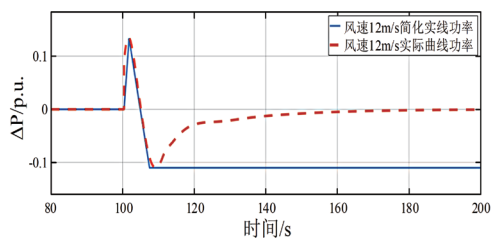


(b) 8 m/s 时简化功率实线与实际功率曲线频率响应对比图

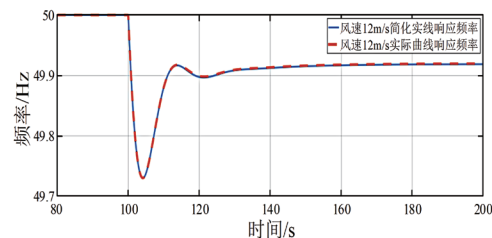


(c) 8 m/s 时简化功率实线与实际功率曲线频率响应误差图

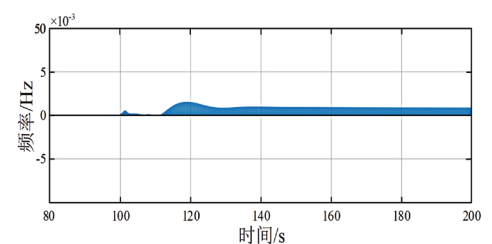
图3 8 m/s 时简化功率实线与实际功率曲线结果对比图



(a) 12 m/s 时简化功率实线与实际功率曲线对比图



(b) 12 m/s 时简化功率实线与实际功率曲线频率响应对比图



(c) 12 m/s 时简化功率实线与实际功率曲线频率响应误差图

图4 12 m/s 时简化功率实线与实际功率曲线结果对比图

从图 3 (a) (b) 可以看出，8 m/s 时简化功率实线与实际功率曲线在功率增发段较为拟合，在转速恢复段有一定的误差，但两者的频率响应结果误差也几乎吻合，从图 4 (c) 可以看出，两者的频率响应误差结果较小，均小于 0.005 Hz；从图 4 (a) (b) 可以看出，12 m/s 时简化功率实线与实际功率曲线在功率增发段十分拟合，但在转速恢复段有较大的误差，但两者的频率响应结果误差仍不是很大，仅在频率恢复极大值处有明显的误差，从图 4 (c) 可以详细看出，两者的误差更小，要小于 0.002 5 Hz。

从图 3 (a) 和图 4 (a) 可以看出，随着风速的增大功率曲线的拟合度逐渐减小，从图 3 (c)、图 4 (c) 可以看出随着风速的增大频率响应局部误差逐渐减小，整体误差逐渐增大，但最大误差也仅为 0.005 Hz。以上可以得出，采用简化功率实线代替实际功率曲线对系统频率响应产生的误差很小，对系统频率影响也很小。

4 结语

本文深入探讨了风电场调频响应指标的决策方法，针对电力系统“双高”特性导致的频率调节能力减弱问题，提出了基于分步寻优和通用系统频率响应 (GSFR) 模型的快速决策方案。研究通过仿真验证了该方案的可行性和快速性，结果表明，分步寻优策略能够有效应对各指标间的耦合关系

混响室环境中矢量网络分析仪 S 参数自动测量程序的开发

庞荃芪¹ 赵翔¹
PANG Quanqi ZHAO Xiang

摘要

混响室通过其内置搅拌器的旋转能够提供随机变化的电磁环境，从而满足电磁兼容和无线通信领域的测量需求。在混响室环境中使用矢量网络分析仪（vector network analyzer, VNA）测量待测设备的多组 S 参数数据时，测量过程繁复。文章基于 LabVIEW 开发了 S 参数自动测量程序，实现了对 VNA 的自动控制，包含 VNA 识别、初始化和参数设置以及 S 参数的读取和存储。该程序不仅提高了测量效率，还避免了人工操作误差，可应用于混响室内天线效率、材料吸收截面等参数的测量。

关键词

混响室；矢量网络分析仪；LabVIEW；S 参数；自动化测量

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.05.039

0 引言

混响室本质上是一个电大多模、高品质因数的谐振腔，由金属屏蔽室和搅拌器构成。搅拌器的旋转改变了混响室的边界条件，从而赋予混响室产生随机变化电磁环境的能力，可应用于电磁兼容和无线通信领域的测量^[1-3]。

S 参数表示微波网络中某一端口的反射功率和到其他端口的传输功率相对于入射功率的比例，可由端口间归一化电压波的比值求得^[4]。S 参数的实部和虚部包含了幅度和相位信息，可用于评估待测设备（device under test, DUT）的传输和反射特性。矢量网络分析仪（vector network analyzer,

VNA）可同时测量 S 参数的实部和虚部^[5]。在混响室环境中使用 VNA 对 DUT 进行测量时，需要重复获取 DUT 在不同搅拌器位置下的 S 参数。

随着混响室研究的不断深入，其在电磁兼容和无线通信测量领域的应用也不断拓展，实验数据更加复杂，测量过程的自动化操作需求也在增加^[6]。2007 年，王晓伟^[7]基于 C++ 程序控制场强探头和频谱分析仪，实现了混响室空腔室校准和最大加载校准的自动化；2014 年，许宏光^[8]基于 C# 设计了混响室环境中 DUT 的辐射抗扰度自动测试程序；2018 年，王少华等人^[9]基于 LabVIEW 程序控制场强探头实现了混响室的场均匀性的自动测试；Amorim 等人^[10]基于 MATLAB 软件控制频谱分析仪实现了混响室的品质因数测试的自动

1. 四川大学电子信息学院 四川成都 610065

和无规律变化，实现风电场调频响应指标的快速确定。同时，采用简化功率实线代替实际功率曲线的方法，在保证计算精度的前提下，显著提高了计算速度，满足了风电场快速响应调频需求。通过对比不同风速下的简化功率实线与实际功率曲线及其对应的频率响应，发现简化功率实线在功率增发段与实际功率曲线拟合度较高，且频率响应误差较小，验证了简化功率实线替代方法的有效性。本文提出的风电场调频响应指标决策方法具有快速、准确、实用的特点，能够为风电场参与电力系统频率调节提供有力的技术支持，对于促进新能源的充分利用和电力系统的稳定运行具有重要意义。

参考文献：

[1] 陈亦平, 卓映君, 刘映尚, 等. 高比例可再生能源电力系统的快速频率响应市场发展与建议 [J]. 电力系统自动化, 2021, 45(10):174-183.

[2] MENG X, LIU J J, LIU Z. A generalized droop control for grid-supporting inverter based on comparison between traditional droop control and virtual synchronous generator control[J]. IEEE transactions on power electronics, 2019, 34(6): 5416-5438.

[3] 彭琰, 马骏超, 金字清, 等. 风电参与电网频率支撑的快速仿真模型 [J]. 浙江电力, 2022, 41(5):40-46.

[4] 张冠锋, 杨俊友, 孙峰, 等. 基于虚拟惯量和频率下垂控制的双馈风电机组一次调频策略 [J]. 电工技术学报, 2017, 32(22): 225-232.

【作者简介】

张泰东（1999—），男，安徽肥东人，硕士研究生，助理工程师、机电设备管理员，研究方向：电机与电器。

（收稿日期：2025-01-09 修回日期：2025-04-16）